

А.С. БОРИСЕНКО, аспирант, ХНУРЭ, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АНТЕНН ДЛЯ ZIGBEE СЕТИ

Проведен обзор антенн (для *ZigBee сети*), моделирование и расчет работы спиральной антенны. Приведены результаты экспериментального исследования и сравнения показателей применения различных антенн в беспроводной сети ZigBee.

Ключевые слова: ZigBee, спиральная антенна, направленная антенна, штыревая антенна, зона покрытия, моделирование.

Введение. Беспроводные сети на базе стандарта IEEE 802.15.4 представляют собой альтернативу проводным соединениям в распределенных системах мониторинга и управления и отличаются гибкостью архитектуры, малыми затратами при их установке и эксплуатации.

Одним из способов увеличения зоны покрытия беспроводной сенсорной сети является использование направленных антенн, которые не меняют параметр *эквивалентной изотропной излучаемой мощности* (ЭИИМ), но изменяют диаграмму направленности, осуществляя таким образом «усиление» сигнала в определенном направлении.

Mesh сеть ZigBee (ячеистая) для передачи сообщения автоматически находит наиболее короткий маршрут с удовлетворительным качеством связи в обоих направлениях. Если с течением времени какой-либо из узлов выходит из строя, то сеть автоматически осуществляет поиск нового маршрута и на первом этапе задача поиска маршрута является первостепенной. Но если сеть длительное время не обслуживается и не заменяются ее структурные элементы и элементы питания, то поддержание надежной работы сети в целом при относительно неподвижном состоянии ее элементов, защите информации и увеличении дальности связи становится актуальным. Работа сети со временем приводит к задаче увеличения зоны покрытия с применением антенн.

На диаграмме направленности можно выделить так называемые направления преимущественного излучения (*лепестки*), главное направление (главный лепесток), боковые лепестки, задний лепесток диаграммы направленности (обратный главному направлению). Нули диаграммы направленности определяют направления, по которым антенна не принимает и не излучает.

Важной характеристикой направленной антенны является коэффициент усиления, который показывает, во сколько раз эффективность данной антенны выше по сравнению с изотропным излучателем, и измеряется в так называемых *изотропных децибелах* (дБ или англ. dBi).

$$k(dBi) = 10 \lg \frac{E}{E_i}, \quad (1)$$

где k – коэффициент усиления антенны в заданном направлении; E – напряженность поля, создаваемого антенной в некоторой точке; E_i – напряженность поля, создаваемого изотропной антенной в той же точке.

Анализ последних достижений и литературы. В большинстве случаев приемопередатчики сети ZigBee комплектуются миниатюрными штыревыми антеннами, которые могут быть как съемными, так и несъемными. В горизонтальной плоскости такие антенны являются всенаправленными с коэффициентом усиления не более 5 dBi. Штыревые антенны могут быть прямыми/угловыми разной длины с различными вариантами разъемов (например, RPSMA и SMA-M).

Основные виды промышленных антенн (а всего их более ста) [1], применяемых в диапазоне 2400 МГц, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Виды антенн и их параметры

Название (антенна на магнит- ном осно- вании)	ANT 2.4 BY-2400-03 SMA-M 3M (BEYOND)	ANT 2.4 BY-2400- 01-03 (BEYOND)	ANT 2.4 BY-2400- 06-09 3M RPSMA (BEYOND)	ANT 2.4 BY-2400-02 RPSMA (BEYOND)	ANT 2.4 CW-RCS RPSMA (LINX)
1	2	3	4	5	6
Внешний вид антенны					
Параметры					
Способ монтажа	магнит	нет	магнит	крепление на разъём	крепление на разъём
Типовое примене- ние	индустр.	индустр.	индустр.	индустр.	индустр.
Рабочие частоты	2,4 ГГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц
Кoeffи- циент уси- ления	5 dBi	3 dBi	9 dBi	3 dBi	1,2 dBi
Разъём для подключе- ния	SMA-M	нет	RPSMA	RPSMA	RPSMA
Длина кабеля	3 м	нет	3 м	нет	нет

1	2	3	4	5	6
Примечания	рабочая температура -45...70 С	антенна без внешней защитной части	увеличивает дальность действия ZigBee, Bluetooth и Wi-Fi-устройств	предназначена для ZigBee, Wi-Fi и Bluetooth модемов AnCom	малогабаритная
Размер	30 x 142 мм	4 x 52 мм	350	95	53 x 7 мм

Штыревые антенны часто называют *несимметричными вибраторами*. Диаграмма направленности такой антенны мало отличается от диаграммы направленности *диполя Герца*. В горизонтальной плоскости антенна излучает энергию во все стороны равномерно, поэтому в указанной плоскости такая антенна является всенаправленной. Диаграммы направленностей в вертикальной плоскости полуволнового штыря показывают, что чем выше поднимается антенна, тем ближе угол излучения к горизонту, и это объясняется тем, что происходит сложение излученной штырем волны и волны, отраженной от земли.

Почва является диэлектриком с большой диэлектрической проницаемостью (равной почти 80), что приводит к изменению электрической длины мнимого диполя, а также длины пути токов смещения. Результат – полное искажение диаграммы направленности (поднятие лепестков вверх и исчезновение излучения под малыми углами к горизонту) и увеличение сопротивления штыря [2].

Короткие штыри имеют малое активное и большое реактивное сопротивление и будут согласованы весьма неоптимально (на самих согласующих устройствах может рассеяться до 90% энергии). Только идеальная штыревая антенна имеет КПД 47%, для реальной антенны эта величина оказывается гораздо меньше.

Необходимо также учитывать создаваемую *поляризацию* (то есть направленность вектора электрической составляющей электромагнитной волны в пространстве) для штыревых антенн. Вертикально расположенный несимметричный вибратор дает вертикальную поляризацию, а горизонтально расположенный – горизонтальную. Антенны горизонтальной поляризации дают больший эффект, поскольку природные и промышленные помехи имеют в основном вертикальную поляризацию. Горизонтально поляризованные волны, отражаются от препятствий менее интенсивно, чем вертикально поляризованные.

При распространении вертикально поляризованных волн земная поверхность поглощает на 25% меньше их энергии.

Проблемы согласования штыревой антенны, малый коэффициент усиления, а также способы крепления и установки относительно земли привели

к созданию штыревых антенн не только с перпендикулярным, но и с параллельным рефлекторами.

Физический уровень в системе передачи-приема ZigBee PHY предоставляет два вида услуг: информационный сервис PHY и сервис управления, обеспечивающий взаимодействие с сервисом PLME (Physical Layer Management Entity) точки доступа SAP (известный под названием PLME-SAP). Информационный сервис PHY делает возможным передачу и прием через радиоканал протокольных блоков данных PPDU (Protocol Data Unit). На рис. 1 представлены радиоканалы в IEEE 803.15.4 (PHY 2400 МГц).

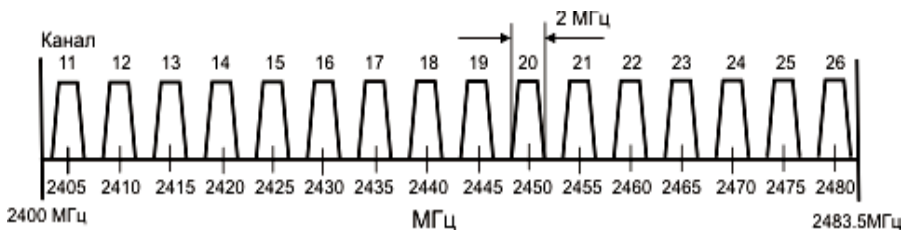


Рис. 1 – Выбор радиоканалов в IEEE 803.15.4 (PHY 2400 МГц).

Целью статьи является описание антенн для работы ZigBee сети, описание особенностей и методики расчета спиральных антенн, выполнение расчета, отображение результатов экспериментальных исследований действующих образцов антенн, сравнение параметров различных антенн по результатам исследований.

Постановка проблемы. Из всего сказанного выше следует учитывать необходимость применения в диапазоне 2400 МГц различных типов антенн.

Антенна должна обеспечивать прием во всех каналах системы с необходимым коэффициентом усиления, поэтому ее элементы нужно рассчитывать с учетом всего диапазона, но целесообразнее выбрать конструкцию «по нижней границе», учесть возможность простого изготовления и согласования. Поэтому применение различного типа антенн для узлов сенсорной сети ZigBee является актуальным и требует дополнительных исследований.

Одним из решений является применение спиральных антенн с рефлектором. Такие антенны были изобретены еще в 1947 году *Джоном Краусом*. Спиральные антенны относятся к классу *антенн бегущей волны*. Диапазон волн определяет вид спиральной антенны. При работе направленной антенны с односторонним излучением (приемом) используют спиральную антенну с рефлектором. Именно эти антенны следует рассматривать как перспективное направление развития сетей ZigBee с увеличением зоны покрытия или увеличения надежности приема за счет увеличения коэффициента усиления такой антенны.

Материалы исследований. Существуют цилиндрические, конические и плоские спиральные антенны. Чаще используют спиральную антенну с рефлектором (экраном), см рис. 2.

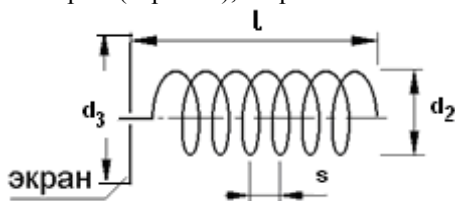


Рис. 2 – Цилиндрическая спиральная антенна: d_2 – диаметр спирали (витка); s – шаг спирали; l – длина намотки; d_3 – радиус рефлектора.

Если необходима узконаправленная антенна, то можно использовать цилиндрическую спиральную конструкцию; коническая спиральная антенна обеспечит более широкую диаграмму направленности (примерно в два раза). Плоские спиральные антенны являются широкополосными.

Применение спиральной антенны как дополнительного устройства приемопередатчиков в сети Zigbee позволяет решить не-

сколько задач:

- улучшить надежность передачи;
- увеличить дальность передачи-приема при выходе из строя некоторых элементов сети;
- увеличить общее время работы сети.

Диаграмма направленности спиральной антенны состоит из двух лепестков, расположенных вдоль оси спирали по разные стороны от нее [3].

Спиральная антенна характеризуется количеством витков n , диаметром витков d_2 и шагом спирали s . Чем больше витков содержит такая антенна, тем выше коэффициент усиления. При этом радиус витка обычно выбирается исходя из условия, чтобы длина витка соответствовала длине волны излучения, диаметр витка для оптимальной конструкции равен

$$d_2 = \frac{\lambda}{\pi}, \quad (2)$$

а шаг спирали должен быть равен четверти длины волны излучения, если необходимо получить круговую поляризацию,

$$s = 0,25\lambda. \quad (3)$$

Угол спирали $\alpha = 12^\circ$.

Размер рефлектора, который устанавливается перпендикулярно оси спирали и может иметь форму диска или квадрата, должен быть не меньше длины волны излучения. Минимальные размеры рефлектора (экрана)

$$d_3 = 0,62\lambda. \quad (4)$$

Входное сопротивление антенн, Ом, при условии $12^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ и длины периметра витка c в диапазоне $0,75\lambda \leq c \leq 1,33\lambda$ при количестве витков $n > 3$ связаны зависимостью:

$$R \approx 140 \frac{c}{\lambda}. \quad (5)$$

Ширина основного лепестка диаграммы направленности, градусы, по уровню половинной мощности составляет:

$$\theta_{0,5} = 52 \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{ns}{\lambda}}. \quad (6)$$

Коэффициент усиления такой антенны может быть рассчитан по формуле Крауса

$$G = 11,8 + 10 \lg \left(\left(\frac{c}{\lambda} \right)^2 \cdot n \cdot d_2 \right). \quad (7)$$

Конструкция спиральной антенны представляет собой металлическую спираль, питаемую коаксиальной линией, которая имеет в общем случае круговую поляризацию и большой коэффициент усиления. При работе на передачу спиральная антенна излучает поле с вращающейся поляризацией, право или лево поляризованное, в зависимости от направления намотки спирали. При работе на прием она принимает либо поле вращающейся поляризации с направлением вращения, как и при передаче, либо поле любой линейной поляризации. Сигнал с линейной поляризацией (вертикальной или горизонтальной) на такую антенну принимается с уменьшением коэффициента усиления на три децибела. Антенна вызывает круговую поляризацию, которая может быть как право-, так и левосторонней – в зависимости от того, как намотана спираль.

Такие антенны должны применяться только в паре, то есть если на приемопередающем узле сети используется спиральная антенна, то и на другом узле должна быть спиральная антенна с одинаковой намоткой спирали.

Согласование сопротивления с линией производится посредством четвертьволнового трансформатора. Самый изящный метод согласования – использование куска меди в форме прямоугольного треугольника, который является продолжением провода, намотанного вокруг трубы. Катеты треугольника для частоты 2437 МГц имеют размеры 71х17 мм. С одной стороны треугольник подпаивается к проводу, а с другой соединяется с центральным штырем разъема N-серии [4].

Параметры антенны могут значительно изменяться при небольшом изменении размеров элементов и их взаимного расположения. Поэтому очень важно выполнить полный расчет элементов такой антенны, их изготовление и провести проверку конструкции антенны в реальных условиях эксплуатации для сети Zigbee, так как при настройке можно скорректировать только шаг между витками («растянуть» спираль).

По сравнению с директорными антеннами у спиральных антенн точность изготовления и размеры ее элементов не являются столь критичными, она имеет меньшие размеры при таком же коэффициенте усиления. Расчет

такой спиральной антенны с использование программы [5] для системы ZigBee представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчета спиральной антенны

	Частота 2350 МГц	Частота 2350 МГц	Частота 2400 МГц	Частота 2483,5 МГц
Параметр, и/или формула для расчета параметра	Расчет по формулам, значение	Расчет с помощью программы	Расчет с помощью программы	Расчет с помощью программы
Длина волны, λ , мм	127,6	127,6	125	120,7
Число витков спирали, n	7	7	7	7
Шаг спирали между центрами, мм (выбран) $s = 0,2\lambda$	25,52	25,52	25	24,1
Длина спирали l_2 , мм $l_2 = ns$	178,64	178,7	175	169,1
Общая длина провода, мм	953,58	974,4	954,1	922,1
Внутренний диаметр спирали d_2 , мм $d_2 = \lambda/\pi, d_2 = 0,34\lambda$	40,63...43,38	43,5	42,6	41,2
Диаметр провода d , мм (0,01...0,03) λ	2,5	2,5	2,5	2,4
Минимальный диаметр рефлектора d_3 , мм, формула (4)	79,11	79,1	77,5	74,8
Приблизительное усиление антенны G , dBi	6,34...7,19	11,96	11,96	11,96
Входное сопротивление антенны R , Ом, формула (5)	140...149,45	140	140	140
Полоса частот по уровню 1 дБ		1,06	1,06	1,06
F_{\max} , МГц		2426,57	2478,2	2564,42
F_{\min} , МГц		2275,84	2324,26	2405,12
Полоса частот по уровню 3 дБ		1,17	1,17	1,17
F_{\max} , МГц		2552,59	2606,9	2697,6
F_{\min} , МГц		2163,48	2209,51	2286,39
Ширина основного лепестка, градусы, формула (6), по уровню 3дБ	61,52...57,47	43,9	43,9	43,9

Была изготовлена спиральная антенна по расчетным данным, представленным в табл. 2, для всей полосы частот, см. рис. 3.

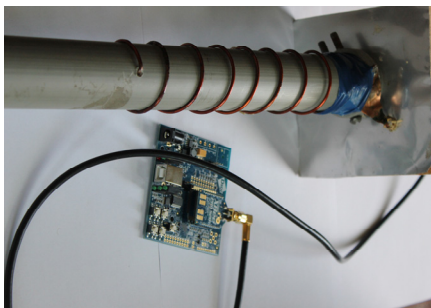


Рис. 3 – Внешний вид разработанной и изготовленной спиральной антенны.

Результаты исследований. Были проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости между показателями передачи пакетов и расстояниями между модулями ZigBee. Эксперименты проводились для спиральной антенны, устанавливаемой на подвижный модуль, неподвижный модуль был подключен к персональному компьютеру, использовалась программа моделирования, настройки и отображения работы сети X-CTU. Аналогичные исследования проводились и для штыревых антенн разных типов. В табл. 3 – 5 представлены результаты экспериментальных исследований.

Таблица 3 – Экспериментальные результаты для условий прямой видимости с использованием штыревой антенны типа ANT 2.4 BY-2400-02 RPSMA

№ Эксперимента	Временной интервал между пакетами, мс	Пакеты, размер 32 байт			Уровень сигнала на входе приемника, дБ	Расстояние между модулями, м
		Принятые, кол.	Не принятые, кол.	Процент принятых пакетов, %		
1	6000	10	0	100	-40	0
2		10	0	100	-51	6
3		10	0	100	-63	12
4		9	1	90	-67	18
5		9	1	90	-70	24
6		8	2	80	-75	30
7		9	1	90	-76	36
8		8	2	80	-77	42
9		9	1	90	-81	48
10		9	1	90	-85	54

Таблица 4 – Экспериментальные результаты для условий прямой видимости с использованием штыревой антенны ANT 2.4 CW-RCS RPSMA

№ Эксперимента	Временной интервал между пакетами, мс	Пакеты, размер 32 байт			Уровень сигнала на входе приемника, дБ	Расстояние между модулями, м
		Принятые, кол.	Не принятые, кол.	Процент принятых пакетов, %		
1	6000	10	0	100	-40	0
2		10	0	100	-46	6
3		10	0	100	-50	12
4		10	0	100	-57	18
5		10	0	100	-63	24
6		9	1	90	-69	30
7		10	0	100	-75	36
8		10	0	100	-79	42
9		9	1	90	-83	48
10		8	2	80	-87	54

Таблица 5 – Экспериментальные результаты для условий прямой видимости с использованием разработанной спиральной антенны

№ Эксперимента	Временной интервал между пакетами, мс	Пакеты, размер 32 байт			Уровень сигнала на входе приемника, дБ	Расстояние между модулями, м
		Принятые, кол.	Не принятые, кол.	Процент принятых пакетов, %		
1	6000	10	0	100	-49	0
2		10	0	100	-53	6
3		10	0	100	-59	12
4		10	0	100	-61	18
5		10	0	100	-65	24
6		10	0	100	-70	30
7		10	0	100	-72	36
8		9	1	90	-74	42
9		10	0	100	-75	48
10		8	2	80	-76	54

Выводы. Сравнение результатов для трех типов антенн при одних и тех же условиях проведения эксперимента показывает весьма надежную связь при применении спиральных антенн на расстоянии, менее надежную связь при использовании антенн ANT 2.4 BY-2400-02 и ANT 2.4 CW-RCS (расстояние для надежно принятого сигнала до 20 м соответственно). Несмотря на указанный в паспорте антенны ANT 2.4 BY-2400-02 коэффициент усиления

ния 3 dBi, антенна проявила себя с худшей стороны по сравнению с четвертьволновой.

Применение для модулей сети ZigBee спиральных антенн определяется условиями развертывания сети и гарантирует в течение всей ее работы надежную связь, повышая качество приема по сравнению с другими антеннами.

Список литературы: 1 Новые антенны диапазона 2,4 ГГц для Wi-Fi, ZigBee и Bluetooth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compel.ru/2010/06/24/novye-antenny-diapazona-24-ggc-dlya-wi-fi-zigbee-i-bluetooth/> – 30.04.2013 г. – Загл. с экрана. 2 Штыревые антенны И. Григоров (UZ3ZK), 308015, Белгород-15, а/я 68 (РЛ 7/92) 18 июня 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.shema.ru/articles/category/editorial/> – 30.04.2013 г. – Загл. с экрана. 3 Спиральные антенны EW8AU Владимир Приходько [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ew8au.narod.ru/index.htm> – 30.04.2013 г. – Загл. с экрана. 4 Направленные антенны для беспроводных устройств стандарта 802.11b/g. Сергей Пахомов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compress.ru/Archive/CP/2006/4/49/#> – 8.05.2013 г. – Загл. с экрана. 5. Расчет спиральной антенны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aerial.dxham.ru/onlajn-raschety/raschety-antenn/raschet-spiralnoj-antenny> – 10.04.2013 г. – Загл. с экрана.

Поступила в редколлегию 20.05.2013

УДК 621.968: 519.6

Моделирование и расчёт антенн для ZigBee сети / А. С. Борисенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №37 (1010). – С. 17 – 26. Бібліогр.: 5 назв.

Проведений огляд антен (для ZigBee мережі), моделювання і розрахунків роботи спіральної антени. Приведені результати експериментального дослідження і порівняння показників застосування різних антен в бездротовій мережі ZigBee.

Ключові слова: ZigBee, спіральна антена, спрямована антена, штиркова антена, зона покриття, моделювання.

In this article are conducted review of antennas, their simulation and calculation of spiral antenna for ZigBee network. There are given results of experimental measurements and comparison of application of antennas in the wireless network of ZigBee.

Key words: ZigBee, spiral aerial, directed aerial, pintle aerial, area of coverage, design.

УДК 621. 822

А.В. ГАЙДАМАКА, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ ОДНОРЯДНОГО РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА: УЧЁТ УГЛОВ КОНТАКТА

Уточнено распределение радиальной нагрузки между телами качения идеального однорядного радиального подшипника с учётом углов контакта тел качения с кольцами. Выявлены касатель-

© А. В. Гайдамака, 2013